

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82505

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04647

研究課題名（和文）貯蔵容器から漏出する多成分系液体燃料蒸気の拡散挙動に関する研究

研究課題名（英文）Diffusion behavior of vapor of the multi-component liquid fuel spill from a storage container

研究代表者

岡本 勝弘 (Okamoto, Katsuhiko)

科学警察研究所・法科学第二部・室長

研究者番号：40356176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、多成分系液体燃料であるガソリンの重量蒸発率を蒸発の進行を表す指標としてその物性変化をモデル化することにより、貯蔵容器から漏出したガソリン蒸気の拡散挙動の予測手法開発を目的とした。

10種類の自動車ガソリンを試料に選定し、蒸発の進行による蒸気圧変化を測定することによって、任意の温度・蒸発率における蒸気圧予測に必要な蒸気圧定数をそれぞれ導出し、ガソリンが貯蔵容器等から漏洩した場合に適用可能なガソリン蒸発拡散モデルを提唱した。

さらに、予測モデルにより得られたガソリン蒸気濃度から、着火時の爆発圧力を予測することによって、床面ガソリンに起因する爆発被害の評価手法を提唱した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガソリン保管場所におけるリスクマネジメントには、漏洩ガソリンの蒸発拡散性状や着火後に想定される被害の大きさを事前に予測する必要があるが、ガソリンは200種類以上の成分で構成される多成分系の工業製品であることから、蒸発によって成分組成が変化して複雑な蒸発拡散挙動を示すことに加え、漏洩により床面に形成されるガソリン面積が変化することから、漏洩ガソリンに起因する火災危険性の正確な予測は困難であった。本研究で提案した手法は、ガソリン漏洩時におけるガソリン蒸発拡散挙動及び着火危険性の予測を可能とするものであり、床面に漏洩ガソリンに起因する火災危険性に評価に有用な情報を提供できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop a method for predicting the diffusion behavior of gasoline vapor leaking from a storage container by modeling changes in the evaporative characteristics of gasoline, which is a multi-component liquid fuel, using the mass loss fraction as an index of the progress of evaporation. We selected 10 types of automobile gasoline as samples and measured the vapor pressure change with the progress of evaporation. The vapor pressure constants were derived by analyzing the measured vapor pressures. A prediction model was proposed for the evaporative diffusion behavior of gasoline that can be applied when gasoline leaks from a storage container using the vapor pressure constants. Furthermore, we calculated the explosion pressure from the gasoline vapor concentration obtained by the prediction model, and proposed a method to evaluate the explosive damage caused by gasoline leaked on the floor.

研究分野：安全工学

キーワード：引火性液体 ガソリン 漏洩 蒸発速度 火災 爆発圧力 リスクマネジメント 車両火災

1. 研究開始当初の背景

ガソリンは引火性、燃焼性、揮発性がいずれも高いことから、その取り扱い時における火災発生リスクが極めて高く、火災発生時には、大きな火災を形成するだけでなく、条件によっては圧力上昇を伴う爆発的燃焼を引き起こすことがあり、甚大な被害を生じさせることが多い。このため、ガソリンをはじめとする可燃性蒸気取扱場所における防災管理など安全工学分野において、ガソリンの火災危険性を多角的に明らかにすることが求められている。

ガソリンは、200種類以上の成分から構成される多成分系の工業製品であることから、蒸発により、成分組成が変化し、単成分系に比べて複雑な蒸発拡散挙動を示すことが予想される。そこで、多成分系液体燃料の蒸気圧や蒸発速度といった蒸発特性を明らかにするために、2~5成分系の炭化水素混合物を試料に用いて蒸発の進行によるこれらの蒸発特性変化を測定し、重量蒸発率を蒸発の進行を表す指標として蒸発特性変化をモデル化できることを見出した¹⁾。また、数種の自動車ガソリンを試料に用いて蒸発の進行によるこれらの蒸発特性変化を測定し、重量蒸発率を用いてガソリンの蒸気圧及び蒸発速度の変化をモデル化できることを見出した²⁾。さらに、ガソリン液面からの蒸発拡散現象の予測モデルを提唱し、ガソリン液面周囲のガソリン蒸気濃度分布の実測結果及び拡散蒸気への着火実験結果と比較・検討することにより、提唱した予測モデルによってガソリン液面から発生するガソリン蒸気に対する着火危険性を予測できることを示した³⁾。上記と同様の検討をガソリン灯油混合燃料及びETBE添加ガソリンを試料に用いて行うことにより、これらの燃料についても液面から発生する可燃性蒸気への着火危険性の予測手法を提唱した^{4,5)}。

これまでの一連の研究成果は、貯蔵容器から既に漏洩した状態を想定したガソリン液量や液面形状が固定された条件を対象としてきているが、貯蔵容器からのガソリンが少量ずつ漏洩するような条件においては、漏洩速度が蒸発拡散速度よりも遅くなり、漏洩過程が律速段階となることが予想され、既存のモデルでは貯蔵容器から漏出するガソリンに起因する正確な蒸発拡散挙動予測が困難であった。

2. 研究の目的

本研究においては、これまでの研究成果を発展させることによって、様々な漏出条件におけるガソリン蒸気の危険性予測を可能とする貯蔵容器からの漏出過程を考慮した新規の蒸発拡散モデルについて検討を行い、安全工学実務への即応が可能となるガソリンの危険性予測手法の開発を目的とする。これにより、これまで明らかにされていない多成分系の複雑な蒸発拡散現象を解明し、安全工学の観点から液体燃料の火災危険性について多角的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ガソリン蒸発特性データの収集

自動車ガソリンの製品としての性能は日本工業規格により定められており、蒸発特性に関わる物性としては蒸気圧や蒸留点が規定されている。しかし、これらの規定はある一定の範囲を有するものであり、工業製品としてのガソリンは、販売時期や地域、種別によって、その蒸発特性にばらつきがあるのが実状である。本研究では、ガソリンの蒸気圧測定及び蒸発速度測定を行うことにより、その蒸発特性データを収集した。

販売時期や地域、種別の異なる10種類の自動車ガソリンをガソリンスタンドで購入し、実験試料に用いた。これらを定量的に蒸発させることによって、重量蒸発率が0~0.3までの蒸発変性ガソリン試料を調製した。

蒸発変性ガソリン試料の飽和蒸気圧は、10から40の範囲を5間隔で、自動蒸気圧試験器(田中科学機器製AVP-30D)を用いて測定した。

ガソリンの蒸発速度は、電子式荷重計(ザルトリウス製CP4202S、最小秤量:0.01g)を用いて重量変化を測定することにより、導出した。蒸発実験時には直径80ミクロンのK熱電対を用いて、ガソリン液温の変化も測定した。

(2) 床面漏洩ガソリン蒸気拡散モデル

貯蔵容器から液体ガソリンが漏出してからガソリンが蒸発・拡散した状況を想定した蒸発拡散モデルを提唱し、ガソリン漏出事故が発生した場合における周囲のガソリン蒸気濃度分布を計算し、その着火危険性を予測した。提唱したモデルの妥当性検証を目的として、ガソリン漏洩事故を再現した蒸気拡散実験及び蒸気着火実験を実施し、その結果を予測結果と比較・検討した。これらの実験においては、ビニールシートを張った1m³枠型容器の底面に、チューブポンプを使用してガソリン1Lを散布することにより、ガソリン漏洩事故を再現した(図1)。漏洩速度は、毎分50mL、100mL、200mLに設定した。蒸気拡散実験では、5台の赤外線式ガソリン蒸気濃度計(理研計器製RI-415)を用いて、容器内の高さ10cmから50cmまでの10cm間隔の位置において、ガソリン蒸気濃度測定を行った。蒸気着

火実験では、ガソリン全量漏洩後、ネオントランスに接続した平行ビニール線の先端を容器内の着火高さに設置した。提唱モデルにより予測した可燃範囲到達時間の3分前からガソリン蒸気に着火するまで1分間隔で放電火花を発生させ、ガソリン蒸気に着火した時間を計測するとともに、着火時の燃焼挙動を観測した。

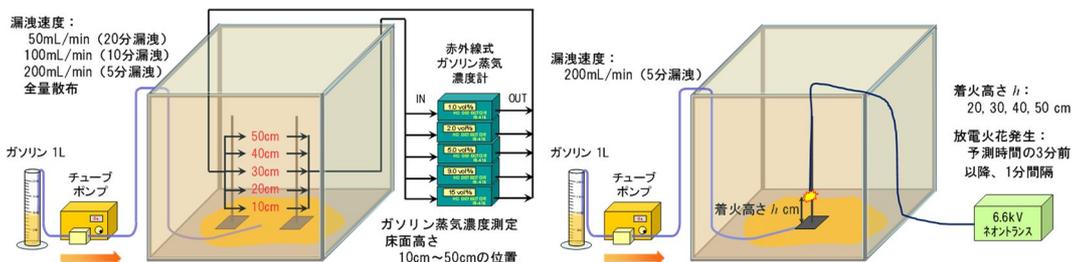


図1 実験装置（左：漏洩ガソリン蒸気拡散実験、右：漏洩ガソリン蒸気着火実験）

(3) ガソリン蒸気着火時に発生する爆風圧の予測

ガソリン蒸気拡散モデルにより得られたガソリン蒸気濃度から、着火時の爆発圧力を予測することによって、貯蔵容器から漏出したガソリンに起因する爆発被害の評価手法を提唱した。

(4) 車両火災時における燃料ガソリンの漏洩性状

ガソリン貯蔵容器として自動車及び原動機付自転車の燃料タンクに着目し、車両火災時における燃料タンクからのガソリン漏出性状を調べるとともに、漏出ガソリンの火炎の影響による隣接自動車への延焼拡大評価を行った。

4. 研究成果

(1) ガソリンの着火危険性評価⁶⁾

10種類のカソリンについて調整した蒸発変性ガソリン試料(重量蒸発率:0, 0.1, 0.2, 0.3)の飽和蒸気圧測定を温度範囲10~40で実施した(図2)。実測飽和蒸気圧の対数を測定温度に対してプロットし、その近似直線の切片と傾きから Clausius-Clapeyron 定数を導出した。これらの定数を重量蒸発率に対して直線プロットすることによって、傾きと切片から蒸気圧定数を導出した(表1)。得られた蒸気圧定数を用いて、(1)式から任意の温度・蒸発率におけるガソリン飽和蒸気圧 p [Pa]を予測可能であることを示した。

$$\ln p = (\alpha_A - \alpha_B / T)a + (\beta_A - \beta_B / T) \quad (1) \text{式}$$

ガソリンの物質移動定数は、ガソリン蒸発実験結果から 8.28×10^{-4} m/s と導出した。引火点においては、ガソリン液面における蒸気濃度がガソリン蒸気 - 空気混合気の LEL である 1.4vol%に等しいと仮定することによって、前記の蒸気圧定数を用いて、蒸発の進行によるガソリン引火点の変化を予測した。予測した引火点は、実測値と一致することが確認できたことから、提案した引火点予測手法により、ガソリンの引火点を正確に予測できることを明らかにした。

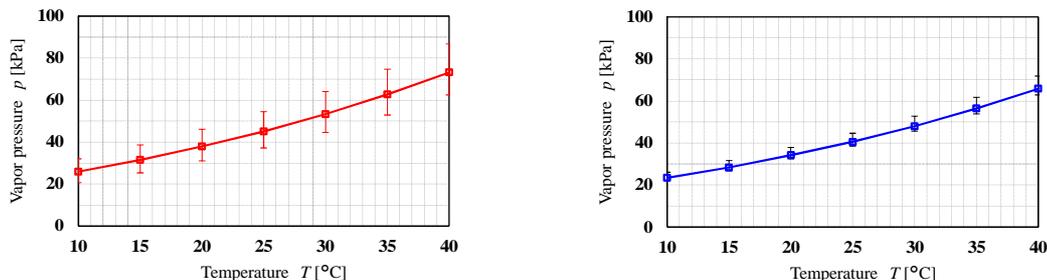


図2 ガソリンの飽和蒸気圧（左：レギュラーガソリン、右：プレミアムガソリン）

表1 ガソリンの蒸気圧定数

試料	α_A [-]	α_B [K]	β_A [-]	β_B [K]
レギュラーガソリン A	2.51	20.9	2.23×10^3	2.96×10^3
レギュラーガソリン B	1.49	21.0	1.74×10^3	3.03×10^3
レギュラーガソリン C	3.71	20.3	2.37×10^3	2.82×10^3
レギュラーガソリン D	1.81	21.1	1.06×10^3	3.13×10^3
レギュラーガソリン E	2.96	21.3	1.74×10^3	3.21×10^3
レギュラーガソリン F	1.52	21.3	1.35×10^3	3.20×10^3
レギュラーガソリン G	2.32	21.0	1.68×10^3	3.11×10^3
プレミアムガソリン A	3.40	21.0	2.14×10^3	3.10×10^3
プレミアムガソリン B	0.90	21.3	1.26×10^3	3.20×10^3
プレミアムガソリン C	1.65	20.7	1.31×10^3	3.01×10^3

(2) 床面漏洩ガソリンの蒸発拡散挙動予測モデルの提唱と妥当性検証^{7,8)}

床面ガソリンから発生したガソリン蒸気の拡散は多成分系の拡散現象であるが、床面漏洩ガソリンの蒸発拡散挙動予測モデルにおいては、ガソリン蒸気を単一成分と仮定し、ガソリン蒸気と空気の2成分系における高さ方向への一次元拡散にモデル化した。床面漏洩ガソリンに起因する領域内のガソリン蒸気分布は、ガソリン蒸気の拡散領域を高さ方向に分割し、ガソリン蒸気の拡散流速が濃度勾配に比例するとして数値積分することによって計算した。境界条件となるガソリン液面における蒸発速度は、ガソリン蒸気圧及びガソリン蒸発実験により導出した物質移動係数、さらに床面ガソリン面積に基づき設定しているが、ガソリンが貯蔵容器から床面に漏洩した条件に対応するため、貯蔵容器からの漏洩速度及びガソリン蒸発量に対応させて床面ガソリン面積を変化させた。

提案した床面漏洩ガソリンの蒸発拡散モデルを検証するため、同様の散布条件におけるガソリン蒸発拡散挙動を予測して、蒸気濃度測定結果と比較した。ガソリン漏洩事故を再現したガソリン蒸気拡散実験における容器内ガソリン蒸気濃度の時間変化の実測値と予測結果（漏洩速度：毎分 200 mL）を図 3 に示す。いずれの漏洩条件においても、実測蒸気濃度と予測結果には良い一致が見られた。また、ガソリン蒸気着火実験における各着火高さでの着火時間を漏洩ガソリン蒸発拡散モデルにより予測した床面高さからガソリン漏洩時の可燃範囲到達時間の関係（漏洩速度：毎分 200 mL）と併せて図 4 に示す。着火実験の結果は、予測した着火時間と良く一致した。以上の結果から、提案した漏洩ガソリン蒸発拡散モデルを用いて、ガソリン床面漏洩時の蒸発拡散挙動及び漏洩ガソリンに起因する火災危険性を予測可能であることが確認でき、提唱した蒸発拡散モデルの妥当性が検証された。さらに、提唱した蒸発拡散モデルは、水成膜泡消火剤を応用したガソリン燃焼抑制剤の定量的な抑制効果の評価に活用できた⁹⁾。

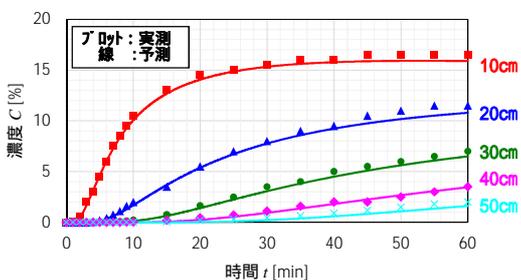


図 3 ガソリン蒸気濃度の時間変化

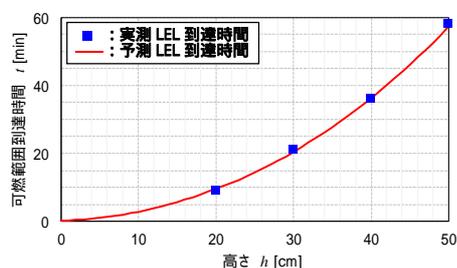


図 4 床面高さから可燃範囲到達時間の関係

(3) ガソリン蒸気着火時に発生する爆風圧の予測^{8,10)}

ガソリン蒸気拡散モデルによる予測結果を進展させ、閉鎖空間内のガソリン蒸気平均濃度から、ガソリン蒸気燃焼時の最大到達爆発圧力を計算する手法を提案した。

ガソリンは、主に炭素数 4 から炭素数 9 の炭化水素によって構成される多成分系混合燃料であることから、ガソリン蒸気は炭素数 6 の飽和炭化水素のみで構成されると仮定し、ガソリン蒸気燃焼時の物質増加と温度上昇に起因する圧力上昇を計算することによって、ガソリン蒸気燃焼時の最大到達爆発圧力を予測した。天井高さ 2.4 m、換気回数毎時 0.5 回の室内にガソリンが漏洩した場合を想定して、ガソリン蒸発拡散モデルを用いて室内の平均ガソリン蒸気濃度を計算し、ガソリン蒸気着火時に発生し得る最大の爆発圧力を蒸発時間に対して計算した（図 5）。蒸発時間の経過により室内のガソリン蒸気が増加するため、最大到達爆発圧力も増加した。

爆発による圧力上昇が 2.1 kPa までは、95%の確率で大きな被害は発生しないとされていることから¹¹⁾、爆風圧 2.1kPa を安全限界と考え、種々の漏洩条件における安全限界到達時間を予測した（図 6）。ガソリン漏洩量が多くなれば安全限界到達時間が短くなるが、ガソリン漏洩量が少なくなると圧力上昇が安全限界に到達しなくなることから、爆発危険を生じさせないガソリン漏洩量を導出することが可能である。提案した爆発圧力の予測手法により、ガソリン漏洩事故におけるリスクマネジメントにおいて、爆発危険性の評価が可能となった。

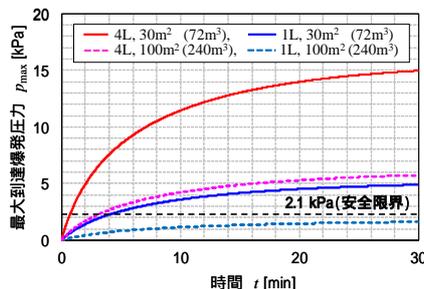


図 5 ガソリン蒸気着火時に発生し得る最大圧力

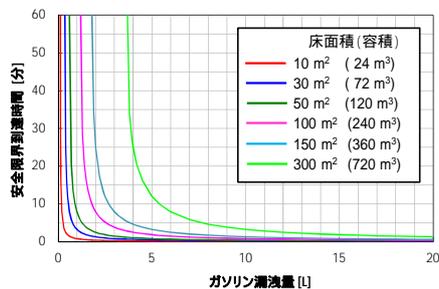


図 6 漏洩量と安全限界到達時間の関係

(4) 車両火災時における燃料ガソリンの漏洩性状^{12,13)}

ガソリンを積載した自動車及びオートバイを用いた燃焼実験を実施し(図7) 車両の燃焼性状を観測するとともに、燃焼車両周囲の熱流束を測定した。また、車両火災時に燃料タンクから漏出するガソリン火炎をモデル化することによって、側面方向への放射熱流束を予測する手法を提案し、隣接自動車のタイヤ及びバンパー可燃物の着火特性と比較することによって、隣接自動車への延焼拡大評価を行った。

なお、燃料タンク内でのガソリン蒸発の漏洩性状を調べるため、燃焼実験前にガソリン4.3Lを給油し、蓋を開放した状態で漏洩速度を測定したところ、1日あたり約76gの減少であった。

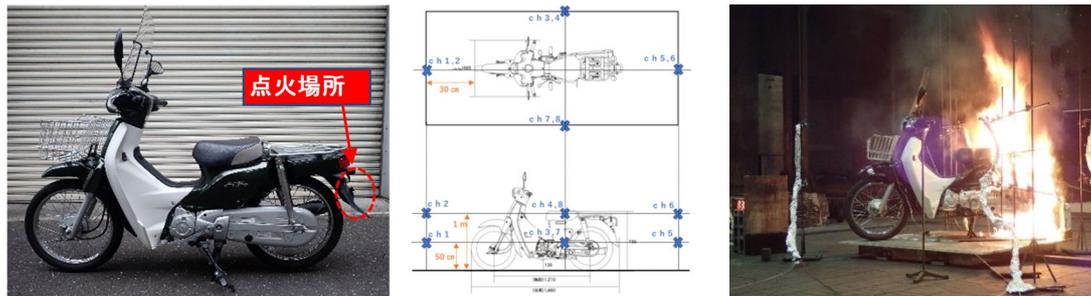


図7 オートバイ燃焼実験(左:実験車両、中:熱流束計設置位置、右:実験状況)

< 引用文献 >

- [1] K. Okamoto, N. Watanabe, Y. Hagimoto, K. Miwa, H. Ohtani: Evaporation characteristics of multi-component liquid, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.23, pp.89-97, 2010.
- [2] K. Okamoto, N. Watanabe, Y. Hagimoto, K. Miwa, H. Ohtani: Change in evaporation rate and vapor pressure of gasoline with progress of evaporation, Fire Safety Journal, Vol.44, pp.756-763, 2009.
- [3] 岡本勝弘, 渡邊憲道, 萩本安昭, 三輪幸司, 大谷英雄: 種々の散布条件におけるガソリン蒸気拡散挙動, 日本火災学会論文集, Vol.59, No.3, pp.73-81, 2009.
- [4] K. Okamoto, M. Hiramatsu, H. Miyamoto, T. Hino, M. Honma, N. Watanabe, Y. Hagimoto, K. Miwa, H. Ohtani: Evaporation and diffusion behavior of fuel mixtures of gasoline and kerosene, Fire Safety Journal, Vol.49, pp.47-61, 2012.
- [5] K. Okamoto, M. Hiramatsu, T. Hino, T. Ohtake, T. Okamoto, H. Miyamoto, M. Honma, N. Watanabe: Evaporation characteristics of ETBE-blended gasoline, Journal of Hazardous Materials, Vol.287, pp.151-161, 2015.
- [6] K. Okamoto, M. Nakagawa, T. Hagiwara, T. Ichikawa, M. Honma: Induced fire hazard by gasoline spills, Fire Safety Journal, 103112, 2020.
- [7] 岡本勝弘, 仲川政宏, 市川俊和, 萩原隆男, 本間正勝: 床面漏洩ガソリンの蒸発拡散性状とその火災危険性, 第52回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.191-194, 2019.
- [8] K. Okamoto, T. Ichikawa, J. Fujimoto, N. Kashiwagi, M. Nakagawa, T. Hagiwara, M. Honma: Prediction of evaporative diffusion behavior and explosion damage in gasoline leakage accidents, Process Safety and Environmental Protection, Vol.148, pp.893-902, 2021.
- [9] 岡本勝弘, 仲川政宏, 清水健介, 市川俊和, 萩原隆男, 本間正勝: 低揮発油を配合した水成膜泡消火薬剤による自動車ガソリン蒸気吸収効果, 日本火災学会論文集, Vol.70, No.3, pp.75-82, 2020.
- [10] 岡本勝弘, 市川俊和, 仲川政宏, 本間正勝: 床面ガソリンから発生するガソリン蒸気とその爆発危険性, 第51回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.191-194, 2018.
- [11] 火薬学会 爆発物探知専門部会編: 爆発物探知ハンドブック, p.104, 丸善, 2010
- [12] 岡本勝弘, 柏木伸之, 藤本純平, 山崎宏樹, 市川俊和, 本間正勝: 自動車火災時における隣接自動車への延焼拡大, 日本火災学会論文集, Vol.71, No.3, pp.61-71, 2021.
- [13] 山崎宏樹, 岡本勝弘, 藤原英之, 岩下友安, 市川俊和, 本間正勝: 原動機付自転車燃焼時における燃焼拡大性及び周囲への熱的影響について, 第55回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.141-144, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okamoto Katsuhiro, Ichikawa Toshikazu, Fujimoto Jumpei, Kashiwagi Nobuyuki, Nakagawa Masahiro, Hagiwara Takao, Honma Masakatsu	4. 巻 148
2. 論文標題 Prediction of evaporative diffusion behavior and explosion damage in gasoline leakage accidents	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Process Safety and Environmental Protection	6. 最初と最後の頁 893 ~ 902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.psep.2021.02.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岡本勝弘, 柏木伸之, 藤本純平, 山崎宏樹, 市川俊和, 本間正勝	4. 巻 71
2. 論文標題 自動車火災時における隣接自動車への延焼拡大	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本火災学会論文集	6. 最初と最後の頁 61-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11196/kasai.71.3_61	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto Katsuhiro, Nakagawa Masahiro, Ichikawa Toshikazu, Hagiwara Takao, Honma Masakatsu	4. 巻 120
2. 論文標題 Induced fire hazards by gasoline spills	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 103112 ~ 103112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.firesaf.2020.103112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岡本勝弘, 仲川政宏, 清水健介, 市川俊和, 萩原隆男, 本間正勝	4. 巻 70
2. 論文標題 低揮発油を配合した水成膜泡消火薬剤による自動車ガソリン蒸気吸収効果	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本火災学会論文集	6. 最初と最後の頁 75 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11196/kasai.70.3_75	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山崎宏樹、岡本勝弘、藤原英之、岩下友安、市川俊和、本間正勝
2. 発表標題 原動機付自転車燃焼時における燃焼拡大性及び周囲への熱的影響について
3. 学会等名 第55回安全工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuhiko Okamoto, Masahiro Nakagawa, Toshikazu Ichikawa, Takao Hagiwara, Masakatsu Honma
2. 発表標題 Induced fire hazard by gasoline spills
3. 学会等名 13th International Symposium on Fire Safety Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本勝弘、仲川政宏、萩原隆男、市川俊和、本間正勝
2. 発表標題 床面漏洩ガソリンの蒸発拡散性状とその火災危険性
3. 学会等名 第52回安全工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本勝弘、仲川政宏、市川俊和、本間正勝
2. 発表標題 床面ガソリンから発生するガソリン蒸気とその爆発危険性
3. 学会等名 第51回安全工学研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------